

# 衛星光通信用次世代補償光学デバイスの研究開発

## 基本計画書

### 1. 目的

衛星－地上間の通信における通信需要の増加に伴い、これまでの電波に加え、大容量通信が可能な光通信の活用に向けた取組が世界的に進められており、我が国でも衛星光通信を利用した宇宙データセンター事業が計画されるなど、社会実装に向けた取組が進んでいる。現在、衛星－地上間の光通信において、低軌道衛星 (LEO: Low Earth Orbit) では数 100Gbps の速度が実現され、静止軌道衛星 (GEO: GEostationary Orbit) では技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) において 10Gbps の実証が予定されているが、衛星光通信が社会実装されると予測される 2030 年頃には通信需要の増加に伴う Tbps クラスの大容量光通信や、アルテミス計画による本格的な月面活動に向けて通信インフラの整備が進む 2030 年代には、月や惑星を周回する衛星－地上間の長距離光通信が求められており、それらの実現のためには、光アンテナの高出力・大口径化への対応が必要となる。宇宙基本計画（令和 2 年 6 月 30 日閣議決定）においても「衛星コンステレーションでの活用等も視野に入れた小型化技術や、今後の我が国の宇宙活動の深宇宙への展開等に備え、更なる超長距離・大容量な宇宙光通信等の基盤技術の確立に向けて取り組む。」とされている。

衛星－地上間の光通信では、大気ゆらぎによるレーザー光の歪みが、通信品質に多大な影響を与える。この大気ゆらぎを解決する有効な手段として補償光学技術があり、欧州宇宙機関 (ESA)、フランス国立宇宙研究センター (CNES) やドイツ航空宇宙センター (DLR) 等において、地上実証実験の報告が積極的に行われるなど、研究開発が進められている。現在は、可変形鏡を用いて幾何学的に歪みの補正を行う方法が一般的であるが、この方法では、制御速度が数 kHz であることから大気ゆらぎが 10kHz 程度の複雑な場合や変動が激しい場合には追従できないという課題がある。Tbps クラスの光通信の実現には、可変形鏡を 100kHz 程度の速度で制御可能であることが必要となる。また、一般に大気ゆらぎ補正では、大気ゆらぎのスケールに応じてレーザー波面を分割して補正するため、光アンテナが大口径になる場合は分割数を増やす必要があるが、多数の可変形鏡分割点を同時に制御することが困難である点や、駆動部分を含めた可変形鏡のサイズを小さくできないという課題がある。さらに、レーザーの高出力化による熱に対し、可変形鏡が損傷する問題もある。

このため、従来の幾何学的な波面制御では困難な高速位相制御を実現するため、

100kHz レベルの制御が可能で、高出力レーザーに対する耐性を有し、大口径アンテナに対応する高分割化が可能な補償光学デバイスを開発し、革新的な次世代補償光学技術を確立する。これにより、Tbps クラスの光通信の実現を図り、国際競争力の強化に資する衛星光通信技術を実現する。

## 2. 政策的位置付け

- 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画（令和4年6月7日閣議決定）  
「通信速度の高速化・大容量化を図るとともに、通信の傍受や干渉の懸念を解消するため、宇宙光通信ネットワーク等の次世代技術の開発・実証を推進する。」とされている。
- 統合イノベーション戦略 2022（令和4年6月3日閣議決定）  
「今後の重要技術と考えられる小型衛星コンステレーションを活用した光通信等について実証を進めるとともに、量子暗号技術等、宇宙通信の高度化に必要な宇宙ネットワーク基盤技術の研究開発を進める。また、災害対策・国土強靱化や地球規模課題の解決に貢献する衛星の研究開発を推進する。」とされている。
- 宇宙基本計画（令和2年6月30日閣議決定）  
「衛星コンステレーションでの活用等も視野に入れた小型化技術や、今後の我が国の宇宙活動の深宇宙への展開等に備え、更なる超長距離・大容量な宇宙光通信等の基盤技術の確立に向けて取り組む。」とされている。

## 3. 目 標

### （1）政策目標（アウトカム目標）

革新的な補償光学技術として、高速・高精度な補正が可能な回折型光位相変調素子を用いた小型・低コストな補償光学デバイスを開発し、普及が見込まれる小型光地上局の送信系及び受信系に実装することにより、2030年頃におけるLEO、GEO衛星とのTbpsクラスの大容量光通信の実現を図る。また、多素子化や高出力レーザーへの耐性を備えることで大型光地上局の送信系へ適用可能とすることにより、2030年代における月を周回する衛星－地上間の長距離光通信の実現を図る。以上のような様々な光通信へ適用可能な次世代補償光学技術の確立により、国際競争力の強化に資する衛星光通信技術を実現する。

### （2）研究開発目標（アウトプット目標）

本研究開発では、Tbps クラスの光通信を実現するために、光地上局の送信系及び受信系に実装する光波面補償を行うデバイスとして、各ピクセルに対して独立に 100kHz レベルでの制御が可能な二次元光位相変調器を開発し、各ピクセルを制御するためのドライバを組み合わせモジュール化する。さらに、モジュールを PC 等の外部制御装置から制御するための制御器を開発する。

これにより、二次元光位相変調器を用いた補償光学デバイス技術を確立し、2m クラスの大口径アンテナにおいて、その口径内にある個々の大気ゆらぎスケール（フリード長）が 2cm（波長  $\lambda = 1550\text{nm}$ ）以下に悪化した結果、焦点位置での光の中心集中度（強度分布の半値全幅）が 1/100 程度（大気ゆらぎスケール/口径）に劣化するような強い大気ゆらぎでも補正可能であることを実証する。

## 4. 研究開発内容

### ① 概要

Tbps クラスの光通信を実現するため、高速位相変調が可能な一次元回折型光変調素子を基礎とし、これを二次元に拡張した光位相制御による補償光学デバイス技術の開発を実施する。

最初に二次元光位相変調素子の設計を行い、その設計に基づいた試作と評価実験及び二次元光位相変調器設計と製作を行う。その上で二次元光位相変調器の制御器開発とモジュール化を行い、二次元光位相変調器を用いた補償光学デバイス技術を確立し、実空間による光通信実験を行う環境を作り、開発したデバイスの評価検討を行う。

### ② 技術課題

#### ア) 二次元光位相変調素子の開発

衛星-地上間の光通信において、細かい大気ゆらぎを補正するために、多くの分割素子数を持つ二次元光位相変調素子を開発する必要がある。補正すべき細かい大気ゆらぎの具体例としては、口径 2m の望遠鏡であれば、その口径上の個々のフリード長が 2cm 程度、すなわち焦点位置での光の中心集中度が 1/100 程度に悪化するレベルである。さらに各素子の反射面は、その補正が機能するために高い表面平滑精度を備えた上で 1 枚の可変形鏡を用いた場合と同等の光学効率を達成する必要がある。

また、従来の素子では受光面で受ける光の強度は  $1\text{W}/\text{cm}^2$  以下で使用する用途が中心であったが、特に送信を行う衛星-地上間通信に使用する際にはより大きな光の強度による熱で破損してしまう問題があった。このため、地上と LEO や GEO 衛星との通信を実現するための通信光の強度 ( $10\text{W}/\text{cm}^2$  クラス) に対する耐性だけでなく、月や深宇宙の惑星を周回する衛星等との光通信

を実現するためには、これまでの 100 倍以上の出力 ( $100\text{W}/\text{cm}^2$  クラス) を持つ高出力レーザーに対しても耐性を持ち、位相変調精度にも劣化を生じない素子を開発する必要がある。

#### イ) 二次元光位相変調器の制御器の開発

補償光学系に実装するため、二次元光位相変調素子は、制御用のインターフェースを備えた位相変調器に組み込まれる必要がある。現在の補償光学系では数 kHz の応答速度であるため、時々刻々と変化する大気ゆらぎの全ての速度成分に追従できていない。このため、位相変調素子の多数の分割素子に対して、大気ゆらぎの時間変化に相当する駆動周波数が制御器には求められる。

#### ウ) 二次元光位相変調素子に対応する補償光学系制御ソフトウェアの開発

二次元光位相変調素子を補償光学系に組み込むため、大気ゆらぎの影響を受けたビームの波面情報を適切に二次元光位相変調素子によって補正するための補償光学系制御ソフトウェアが必要となる。波面計測系から高速で乱れた波面形状を取得し、その波面形状に応じて光の波面を補正するための情報を計算し、その情報を二次元光位相変調素子の制御器に渡す機能がソフトウェアには求められる。

上記補償光学系制御ソフトウェアを一般的な補償光学系に組み込み、その動作検証及び補償光学系における二次元光位相変調素子の性能検証を行う必要がある。

### ③ 到達目標

#### ア) 二次元光位相変調素子の開発

利用可能な通信光の波長は、地上のものと同じく  $1550\text{nm}$  とする。口径  $2\text{m}$  望遠鏡を使った際に、その口径内にある個々のフリード長が  $2\text{cm}$  以下に悪化した場合でも補正を可能とするため、二次元光位相変調素子への入射光との関係から  $10000$  個以上の分割素子数を目標とする。

位相変調素子の性質上、従来の可変形鏡を用いる場合と比較して空間の充填率が低下することを考慮し、光学効率  $70\%$  以上とする。

また、月や深宇宙の惑星を周回する衛星等との光通信を実現することが可能な  $100\text{W}/\text{cm}^2$  以上の高出力レーザーの光の強度に対して、位相変調精度の劣化が発生しないことや熱の耐性を備えることも目標とする。

#### イ) 二次元光位相変調器の制御器の開発

ア) で開発された二次元光位相変調素子の各素子を独立に、かつ  $2\text{cm}$  以下のフリード長の変動を追従可能にする  $100\text{kHz}$  以上の速度で制御することがで

きる制御器を開発する。二次元光位相変調素子を組み込んだ二次元光位相変調器を製作し、当該制御器を備えた制御ドライバと組み合わせてモジュール化を行う。

#### ウ) 二次元光位相変調素子に対応する補償光学系制御ソフトウェアの開発

二次元光位相変調素子が持つ制御信号とのインターフェースをとり、10kHz程度の制御速度で閉ループ制御が出来ることを目指す。

閉ループ制御の検証には Shack-Hartmann センサー等の波面の乱れを計測する計測系と、その計測結果に基づいてリアルタイムに二次元光位相変調素子に反映させることで光の波面を補正するフィードバック制御系からなる補償光学系検証機を構築し、大気ゆらぎを模擬した 1550nm の波長を持つビームをその検証機に入射して補償光学系制御ソフトウェアの動作検証及び補償光学系における二次元光位相変調素子の性能検証を行う。

また、補償光学系における二次元光位相変調素子の性能評価として、口径 2m の望遠鏡においてその口径内にある個々のフリード長が 2cm 以下に悪化した結果、焦点位置での光の中心集中度が 1/100 程度に劣化することに相当する大気ゆらぎがある通信光を入射し、補償光学系を導入しない場合と比較して通信光のシングルモードファイバー（開口数 NA: 0.1 相当）入射効率が 5dB 向上することを目標とする。

## 5. 研究開発期間

令和 5 年度から令和 8 年度までの 4 年間

## 6. その他 特記事項

### (1) 提案及び研究開発に当たっての留意点

- ① 提案に当たっては、基本計画書に記されているアウトプット目標に対する達成度を評価することが可能な具体的な評価項目を設定し、各評価項目に対して可能な限り数値目標を定めるとともに、アウトカム目標の達成に向けた適切な研究成果（アウトプット等）の取扱方策（研究開発課題の分野の特性をふまえたオープン・クローズ戦略を含む）について提案すること。また、本研究開発成果を確実に展開し、アウトカム目標を達成するため、事業化目標年度、事業化に至るまでの実効的な取組計画（事業化及び標準化活動、体制、資金等）についても具体的に提案書に記載すること。
- ② 実用化に向け、諸外国の研究開発動向や民間小型衛星コンステレーション事

業者やシスルナ通信等の事業動向・ニーズを調査し、適用先を明確化した上で開発を進め、実用化目標年度、実用化に至るまでの段階を明示した取組計画等を記載し、提案すること。また、製品・サービスの実現に向けたアプローチが考えられる場合には、製品として実装する際のコスト・生産性等（メンテナンス等の後年度負担やソフトウェア産業への展開、衛星搭載等の本技術の応用展開も含む）への配慮を含め、具体的な取組計画を記載しつつ、提案すること。

- ③ 目標を達成するための具体的な研究方法、実用的な成果を導出するための共同研究体制又は研究協力体制について研究計画書の中にできるだけ具体的に記載すること。複数機関による共同研究を提案する際には、分担する技術間の連携を明確にし、インターフェースを確保すること。
- ④ 研究開発の実施に当たっては、関連する要素技術間の調整、成果の取りまとめ方等、研究開発全体の方針について幅広い観点から助言を頂くとともに、実際の研究開発の進め方について適宜指導を頂くため、学識経験者、有識者等を含んだ研究開発運営委員会等を開催する等、外部の学識経験者、有識者等を参画させること。なお、本件について不明点がある場合は、本研究開発の担当課室まで問い合わせること。
- ⑤ 本研究開発は総務省施策の一環として取り組むものであることから、総務省が受託者に対して指示する、研究開発に関する情報及び研究開発成果の開示、関係研究開発プロジェクトとのミーティングへの出席、シンポジウム等での研究発表、共同実証実験への参加等に可能な限り応じること。

## （２）人材の確保・育成への配慮

- ① 研究開発によって十分な成果が創出されるためには、優れた人材の確保が必要である。このため、本研究開発の実施に際し、人事、施設、予算等のあらゆる面で、優れた人材が確保される環境整備に関して具体的に提案書に記載すること。
- ② 若手の人材育成の観点から行う部外研究員受け入れや招へい制度、インターンシップ制度等による人員の活用を推奨する。また、可能な限り本研究開発の概要を学会誌の解説論文で公表するなどの将来の人材育成に向けた啓発活動についても十分に配慮すること。これらの取組予定の有無や計画について提案書において提案すること。

## （３）研究開発成果の情報発信

- ① 本研究開発で確立した技術の普及啓発活動を実施するとともに、実用に向けて必要と思われる研究開発課題への取組も実施し、その活動計画・方策については具体的に提案書に記載すること。
- ② 研究開発成果については、原則として、総務省としてインターネット等によ

り発信を行うとともに、マスコミを通じた研究開発成果の発表、講演会での発表等により、広く一般国民へ研究開発成果を分かりやすく伝える予定であることから、当該提案書には、研究成果に関する分かりやすい説明資料や図表等の素材、英訳文書等を作成し、研究成果報告書の一部として報告する旨の活動が含まれていること。さらに、総務省が別途指定する成果発表会等の場において研究開発の進捗状況や成果について説明等を行う旨を提案書に記載すること。

- ③ 本研究開発終了後に成果を論文発表、プレス発表、製品化、Web サイト掲載等を行う際には『本技術は、総務省の「衛星光通信用次世代補償光学デバイスの研究開発」による委託を受けて実施した研究開発による成果です。』という内容の注記を発表資料等に都度付すこととする旨を提案書に明記すること。